



## Performance and Emission Analysis of an Energy System Based on Thermochemical Processes and a Proton-Conducting Electrolyte Fuel Cell

Parisa Mojaver\*

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

\* corresponding author: ([p.mojaver@kut.ac.ir](mailto:p.mojaver@kut.ac.ir))

### Article Info

#### Article history:

Received: 25 August 2025

Revised: 24 November 2025

Accepted: 3 December 2025

#### Keywords:

Proton-conducting SOFC, energy system, machine learning, regression model.

### Abstract

In this study, the performance of a hybrid system based on a thermochemical process and a proton-conducting electrolyte fuel cell is investigated from the perspectives of energy production and environmental emissions. To study the system behavior, machine learning-based regression methods were employed, and after data preprocessing, the models were trained and validated. Subsequently, system optimization was carried out with the objectives of maximizing power output and minimizing environmental emissions. The results indicate that increasing the current density and inlet temperature leads to higher power generation, while high current densities result in increased carbon dioxide emissions. The optimal operating conditions were achieved at a current density of 5798 A/m<sup>2</sup>, a temperature of 800 °C, and a fuel utilization ratio of 0.80. The minimum carbon dioxide emissions, independent of the fuel utilization ratio, were obtained at current densities below 3500 A/m<sup>2</sup>, ranging between 500 and 800 kg/MWh.

### Introduction

Machine learning has become an increasingly powerful tool for enhancing the performance and efficiency of modern energy systems. By analyzing large datasets, ML can reveal hidden patterns that are often overlooked by traditional modeling approaches. These data-driven insights support more accurate prediction of energy demand, improved resource management, and reduced operational costs. SOFCs are recognized as an advanced technology for clean and efficient power generation. Their high electrical efficiency and low pollutant emissions make them valuable in modern energy systems. A key innovation is the use of proton-conducting SOFCs, which transport protons rather than oxygen ions. They offer key advantages such as lower operating temperatures, improved material stability, and reduced ohmic losses. Gasification converts solid waste into combustible syngas containing H<sub>2</sub>, CO, and CH<sub>4</sub>, which can be used directly as fuel. This approach not only reduces landfill-associated emissions but also enhances circular economy objectives by turning waste into valuable energy.

The present study proposes a hybrid waste-to-energy system that couples a proton-conducting SOFC with municipal solid waste gasification while employing ML techniques to optimize net power output and minimize CO<sub>2</sub> emissions. This integration aligns with global efforts toward decarbonization and offers a practical solution for clean and sustainable energy generation.

### Methodology

In this study, an integrated energy system is developed based on a proton-conducting SOFC combined with an MSW gasification unit. The system configuration is illustrated in Figure 1. In the gasification reactor, steam is introduced as the gasifying agent along with MSW as the primary feedstock. Through the gasification reaction presented in Eq. (1), the solid waste is converted into synthesis gas (syngas). This syngas, which mainly consists of H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O, is subsequently supplied to the proton-conducting SOFC, where electrochemical reactions generate electrical power efficiently.

### To Cite this article:

Mojaver, P. 2025. Performance and emission analysis of an energy system based on thermochemical processes and a proton-conducting electrolyte fuel cell, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(2), 127-135.

<https://doi.org/10.24200/ij40.2025.67629.1751>

The elemental ratios of the solid waste, defined as  $z_1$ ,  $z_2$ , and  $z_3$  for O/C, H/C, and N/C, respectively, are incorporated into the model. The composition of syngas is determined using a combined Gibbs free energy minimization and Lagrange multipliers method, based on the ultimate analysis of MSW (C: 48.81%, H: 6.86%, O: 41.09%, N: 2.78%) [15].

The output voltage of the proton-conducting SOFC is calculated by Eq. (2), which includes the Nernst potential and associated voltage losses (Eqs. (3)-(4)) [16-18]. The net electrical power generation and CO<sub>2</sub> emission rate of the integrated system are then evaluated using Eqs. (6) and (7). The regression model predicts system outputs and supports the identification of optimal operating conditions for maximizing power generation while minimizing emissions. According to the Eq. (8), the regression model predicts the response  $Y$ , where  $\beta_0$  is the intercept,  $\beta_1$  and  $\beta_2$  represent input effects, and  $\varepsilon$  is the error term.

## Results and Discussion

A proton-conducting SOFC system powered by MSW-derived syngas is proposed and analyzed in terms of net power output and CO<sub>2</sub> emissions under varying current density, inlet temperature, and fuel-utilization ratio. SOFC voltage and power density align well with benchmark results, demonstrating that the electrochemical model reliably represents SOFC performance (Figure 2).

Figure 3 illustrates the effects of current density and inlet temperature on the net power. The results show that higher current densities and higher temperatures lead to greater power. At low current densities, temperature has little influence, whereas above 5000 A/m<sup>2</sup> power becomes highly temperature-sensitive, rising from 89 kW to 318 kW. Figure 4 examines net power as a function of both current density and fuel-utilization ratio. Maximum power occurs at high current density and low utilization. Below 3000 A/m<sup>2</sup>, power remains nearly constant with increasing utilization, while above this threshold it declines. Sensitivity to current density is greater at low utilization, with power ranging from 114 kW to 318 kW. Figure 5 evaluates CO<sub>2</sub> emissions under

simultaneous changes in current density and temperature. Maximum emissions occur at high current density and low temperature, while minimum values appear at low current density and high temperature. At high densities, CO<sub>2</sub> rises sharply with temperature (1085-4468 kg/MWh). Figure 6 shows CO<sub>2</sub> emissions versus current density and fuel-utilization. Temperature has a negligible effect at a fixed current density. Minimum emissions (500-800 kg/MWh) occur below 3500 A/m<sup>2</sup> regardless of utilization. Figure 7 presents the multi-objective optimization, identifying optimal conditions at 5798 A/m<sup>2</sup>, 800 °C, and 0.80 utilization, yielding 315.3 kW net power and 1001.4 kg/MWh CO<sub>2</sub>. Table 1 confirms high regression reliability through strong R<sup>2</sup> metrics.

## Conclusion

A proton-conducting SOFC system powered by MSW-derived syngas is proposed and analyzed in terms of net power output and CO<sub>2</sub> emissions under varying current density, inlet temperature, and fuel-utilization ratio. The key findings are summarized as follows:

- ✓ Maximum power generation occurs at high current density and low fuel utilization.
- ✓ At high current densities, CO<sub>2</sub> emissions significantly increase with temperature, rising from 1085 to 4468 kg/MWh.
- ✓ Minimum emissions (500-800 kg/MWh) are achieved at current densities below 3500 A/m<sup>2</sup>.
- ✓ The optimal operating point is 5798 A/m<sup>2</sup>, 800 °C, and 0.80 fuel utilization.
- ✓ Under optimal conditions, the net power output reaches 315.3 kW with CO<sub>2</sub> emissions of 1001.4 kg/MWh.

**Funding:** This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions:** All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



## ارزیابی عملکرد و آلاینده‌گی سیستم انرژی مبتنی بر فرآیند ترموشیمیایی و پیل سوختی با الکترولیت هدایت پروتونی

پریسا مجاور\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

\*نویسنده مسئول ([p.mojaver@kut.ac.ir](mailto:p.mojaver@kut.ac.ir))

### چکیده

در پژوهش حاضر، عملکرد یک سیستم ترکیبی مبتنی بر فرآیند ترموشیمیایی و پیل سوختی با الکترولیت هدایت پروتونی برای تولید از دیدگاه انرژی و آلاینده‌گی بررسی شده است. به منظور مدل‌سازی رفتار سیستم، از روش‌های رگرسیونی مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شده و پس از پیش‌پردازش داده‌ها، آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها صورت گرفته است. سپس بهینه‌سازی سیستم با هدف بیشینه‌سازی توان خروجی و کمینه‌سازی آلاینده‌گی زیست‌محیطی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش چگالی جریان و دمای ورودی موجب افزایش توان تولیدی می‌شود، در حالی که چگالی جریان‌های بالا منجر به افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شوند. شرایط بهینه‌ی سیستم در چگالی جریان ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت ۰/۸۰ به‌دست آمده است. کمینه‌ی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در چگالی‌های کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع و مستقل از نسبت مصرف سوخت، در بازه‌ی ۵۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت به‌دست آمده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

### واژگان کلیدی:

انرژی کم‌کربن،

مدل رگرسیونی،

الکترولیت هدایت پروتونی،

روش ترموشیمیایی.

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهشگران به هوش مصنوعی و روش‌های یادگیری ماشین، به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای تحلیل، مدل‌سازی، و بهینه‌سازی سیستم‌های پیچیده‌ی انرژی، توجه گسترده‌ای داشته‌اند. فناوری‌های مذکور با توانایی استخراج روابط غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی، امکان پیش‌بینی دقیق عملکرد سیستم‌ها را بدون نیاز به حل معادله‌های پیچیده‌ی فیزیکی فراهم می‌سازند.<sup>[۱]</sup> به‌ویژه در سیستم‌های انرژی پیشرفته، که شامل فرآیندهای چندفازی، واکنش‌های شیمیایی، و برهم‌کنش‌های حرارتی هستند، استفاده از مدل‌های داده‌محور می‌تواند نقش مهمی در بهبود طراحی، بهره‌برداری، و کاهش آلاینده‌گی ایفا کند.<sup>[۲]</sup> ترکیب یادگیری ماشین با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه نیز چارچوبی کارآمد برای دستیابی هم‌زمان به اهداف فنی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.<sup>[۳]</sup>

از سوی دیگر، افزایش مصرف انرژی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، و تشدید بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضرورت توسعه‌ی سیستم‌های انرژی پاک، کارآمد، و پایدار را بیش از پیش آشکار ساخته است.<sup>[۴]</sup> در این میان، استفاده از منابع تجدیدپذیر و بازیافت پسماندها به‌عنوان سوخت،

رویکردی مؤثر برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مدیریت هم‌زمان چالش‌های زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود.<sup>[۵]</sup> زباله‌های جامد شهری به‌دلیل حجم بالا، ترکیب آلی مناسب، و ارزش حرارتی قابل توجه، پتانسیل مناسبی برای تبدیل به انرژی از طریق فرآیندهای ترموشیمیایی مانند گازی‌سازی دارند. فرآیند گازی‌سازی، علاوه بر کاهش حجم زباله‌های دفنی، امکان تولید حامل-های انرژی با ارزش را فراهم می‌سازد.<sup>[۶]</sup>

گازی‌سازی زباله‌های جامد شهری منجر به تولید گاز سنتز غنی از هیدروژن و مونوکسیدکربن می‌شود، که می‌تواند به‌عنوان سوخت در سیستم‌های پیشرفته‌ی تولید برق استفاده شود.<sup>[۷]</sup> در این راستا، پیل‌های سوختی اکسیدجامد<sup>۱</sup> با هدایت پروتونی به‌دلیل بازدهی الکتریکی بالا، انعطاف‌پذیری سوخت، و قابلیت عملکرد در دماهای بالا، گزینه‌ای مناسب برای تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی گاز سنتز به برق محسوب می‌شوند. گازی‌سازی، علاوه بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، امکان تولید هم‌زمان توان و حرارت را نیز فراهم می‌سازد و به افزایش بازده کلی سیستم کمک می‌کند.<sup>[۸]</sup>

عملکرد پیل سوختی به‌شدت تحت تأثیر شرایط عملیاتی، نظیر: چگالی جریان، دمای ورودی، و نسبت مصرف سوخت قرار دارد.<sup>[۹]</sup> پارامترهای اخیر هم بر توان

<sup>1</sup> solid oxide

استناد به این مقاله:

مجاور، پریسا، ۱۴۰۴. ارزیابی عملکرد و آلاینده‌گی سیستم انرژی مبتنی بر فرآیند ترموشیمیایی و پیل سوختی با الکترولیت هدایت پروتونی. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۲)، صص.

<https://doi.org/10.24200/j40.2025.67629.1751>. ۱۲۷-۱۳۵



انجام بهینه‌سازی هم‌زمان توان خروجی و آلاینده‌گی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است. انتخاب پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی نیز به دلیل دمای کاری پایین‌تر در محدوده‌ی ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، پایداری بالاتر مواد سرامیکی، و کاهش افت‌های اهمی نسبت به انواع هدایت اکسیژنی صورت گرفته است؛ که در نهایت، منجر به افزایش بازده و طول عمر سیستم پیشنهادی شده است.

در پژوهش حاضر، از روش رگرسیون به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد و توسعه‌یافته‌ی یادگیری ماشین به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم انرژی استفاده شده است. فرآیند به‌کارگیری روش رگرسیون، شامل چند مرحله‌ی ساختاریافته و منظم بوده است:

در گام نخست، داده‌های مربوط به عملکرد سیستم انرژی جمع‌آوری شده و مورد پردازش اولیه قرار گرفته‌اند. داده‌های ذکرشده شامل متغیرهای ورودی و خروجی سیستم، پارامترهای عملیاتی، نظیر شرایط کاری مؤثر در عملکرد سیستم پیشنهادی ترکیبی بوده‌اند. در مرحله‌ی بعد، داده‌ها به‌منظور افزایش کیفیت تحلیل، تحت فرآیند پیش‌پردازش قرار گرفته‌اند؛ که شامل حذف داده‌های نامعتبر، کاهش نویز، نرمال‌سازی متغیرها، و شناسایی الگوهای اصلی موجود در داده‌ها بوده است، تا زمینه برای آموزش دقیق مدل فراهم شود. پس از آماده‌سازی داده‌ها، مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی رفتار سیستم انرژی طراحی و فرآیند آموزش آن آغاز شده است. در این مرحله، مدل با استفاده از مجموعه‌ی داده‌های آموزشی، که شامل مقادیر واقعی ورودی و خروجی سیستم بودند، آموزش داده شده است تا بتواند روابط میان متغیرها را به درستی استخراج کند.

به‌منظور دستیابی به بهترین عملکرد مدل، پارامترهای آن با استفاده از روش‌هایی نظیر اعتبارسنجی متقابل برای انتخاب بهینه‌ترین ساختار مدل تنظیم شده‌اند. سپس عملکرد مدل با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشی ارزیابی شده است، تا دقت پیش‌بینی و قابلیت تعمیم‌پذیری آن سنجیده شود. مرحله‌ی اخیر، امکان بررسی درستی مدل در شرایط واقعی و متفاوت را فراهم می‌سازد. در مرحله‌ی آخر، مدل رگرسیونی آموزش‌دیده برای بهینه‌سازی سیستم انرژی استفاده شده است. با تحلیل نتایج پیش‌بینی‌شده، پارامترهای عملیاتی سیستم تنظیم شده‌اند تا شرایط بهره‌برداری بهینه شناسایی شود. فرآیند بهینه‌سازی ذکرشده با هدف افزایش کارایی، بهبود توان تولیدی سیستم، و کاهش میزان آلاینده‌گی زیست‌محیطی انجام شده است.

## ۲. مدل‌سازی و معادله‌های حاکم

در پیکربندی سیستم حاضر، یک سیستم تبدیل انرژی مبتنی بر فناوری پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی معرفی شده است، که منبع سوخت آن از طریق فرآیند گازی‌سازی پسماندهای جامد شهری تأمین می‌شود. چیدمان کلی اجزاء سامانه‌ی مذکور در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در مرحله‌ی نخست، مواد زائد شهری به همراه بخار آب به درون محفظه‌ی گازی‌ساز هدایت می‌شوند تا تحت شرایط دمایی مناسب، واکنش‌های ترموشیمیایی لازم رخ دهد. حاصل فرآیند اخیر، تولید مخلوطی از گازهای قابل احتراق است که به‌عنوان حامل انرژی شیمیایی عمل می‌کند. گاز سنتز تولید و سپس به بخش پیل سوختی منتقل می‌شود، جایی که انرژی شیمیایی آن از طریق فرآیندهای

خالص تولیدی اثرگذار هستند، هم میزان انتشار دی‌اکسیدکربن و سایر آلاینده‌ها را تعیین می‌کنند. در این راستا، مطالعاتی انجام شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

جاو و ژو<sup>۲</sup> (۲۰۲۵)،<sup>[۱۰]</sup> یک سیستم ترکیبی مبتنی بر پیل سوختی اکسیدجامد را مدل‌سازی و بهینه‌سازی کرده و دریافته‌اند که تنظیم مناسب اندازه‌ی پیل سوختی اکسیدجامد می‌تواند بازده انرژی کل سیستم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این نوع داده‌های تحلیل حساسیت، چارچوب مناسبی برای توسعه‌ی مدل‌های سریع یادگیری ماشین جهت ارزیابی عملکرد کلی در بهینه‌سازی‌های چندهدفه فراهم می‌سازد. در مطالعه‌ی دیگر، یو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۶)،<sup>[۱۱]</sup> یک سیستم پیرولیز میکروویو زیست‌توده با تأمین توان از پیل سوختی اکسیدجامد را معرفی کرده‌اند و نتایج آن‌ها شامل اثر نوع زیست‌توده در بازده سوخت نشان داده است که این قابلیت را دارند که به‌عنوان داده‌های پایه برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی بازده پیل سوختی اکسیدجامد استفاده شوند. قربانی و همکاران (۲۰۲۴)،<sup>[۱۲]</sup> با بررسی یک سیستم تولید هیدروژن از بیوگاز و پیل سوختی اکسیدجامد از یادگیری ماشین، روابط پیش‌بینی‌کننده‌ی خروجی‌ها مانند نرخ تولید هیدروژن و سود سالیانه را مدل‌سازی کرده‌اند. لی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۳]</sup> کنترل ولتاژ خروجی پیل سوختی اکسیدجامد را با بهره‌گیری از یادگیری تقویتی عمیق چندعاملی بهبود بخشیده و دریافته‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در افزایش عمر مفید و پایداری عملیاتی سیستم نقش مهمی داشته باشند. در نهایت، وانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>[۱۴]</sup> یک چارچوب ترکیبی، شامل: مدل چند فیزیکی، یادگیری عمیق، و بهینه‌سازی ژنتیک برای بهبود عملکرد و دوام پیل سوختی اکسیدجامد ارائه کرده و دریافته‌اند که استفاده از یادگیری ماشین می‌تواند به کاهش تخریب و افزایش طول عمر سیستم منجر شود.

در پژوهش حاضر، با توسعه و یکپارچه‌سازی یک سیستم انرژی مبتنی بر پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی و واحد گازی‌سازی زباله‌های جامد شهری، یک سیستم ترکیبی برای تولید انرژی پایدار ارائه شده است. بهره‌گیری از پسماندهای شهری به‌عنوان منبع سوخت، ضمن کمک به مدیریت مؤثر زباله‌ها، امکان تولید انرژی پاک و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد. ادغام فرآیند گازی‌سازی با پیل سوختی موجب استفاده‌ی بهینه از انرژی شیمیایی موجود در زباله‌ها می‌شود و بازده کلی سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین، به‌کارگیری روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم، رویکردی نوآورانه محسوب می‌شود، که پژوهش حاضر را از بسیاری از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد.

ضرورت انجام پژوهش حاضر از چند منظر قابل‌توجه است: (۱) رشد روزافزون تولید زباله‌های شهری نیازمند ارائه‌ی راهکارهای کارآمد برای تبدیل پسماندهای شهری به منابع ارزشمند انرژی است. (۲) با توجه به چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و لزوم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه‌ی سیستم‌های انرژی پاک و کم‌کربن اهمیت ویژه‌ای دارد.

در مقایسه با مطالعات پیشین، که عمدتاً بر تحلیل ترمودینامیکی یا بهینه‌سازی جداگانه‌ی اجزاء سیستم تمرکز داشته‌اند، نکته‌ی حائز اهمیت مطالعه‌ی کنونی عبارت از تلفیق گازی‌سازی زباله‌های شهری با پیل سوختی هدایت پروتونی و

<sup>4</sup> Li

<sup>5</sup> Wang

<sup>2</sup> Gao & Zhou

<sup>3</sup> Yue

که در آن،  $P_1$  فشار جزئی اجزاست و اندیس‌های  $a$  و  $c$  برای آند و کاتد استفاده شده‌اند،  $T$  دما و  $\bar{R}$  ثابت جهانی گاز را نشان می‌دهند. همچنین،  $F$  به ثابت فارادی،  $\bar{g}^\circ$  به انرژی آزاد گیبس استاندارد،  $J$  به چگالی جریان، و  $J_0$  به چگالی جریان تبدیلی اشاره دارند.  $\delta$  ضخامت و  $\tau$  رسانایی را نشان می‌دهند و  $P^{TPB}$  به فشار جزئی در مرز سه فاز اشاره دارد.

توان تولیدی توسط پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی ( $W$ ) مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:<sup>[۱۷]</sup>

$$W = NAVJ \quad (5)$$

که در آن،  $N$  به تعداد سلول‌ها و  $A$  به سطح فعال اشاره دارند. در پژوهش حاضر، ۱۱۰۰۰ سلول استفاده شده و سطح فعال برابر ۰/۰۱ مترمربع بوده است. اختلاف دمای ورودی و خروجی پیل سوختی ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس، نسبت بخار به کربن آن ۲، و مقدار ثابت فارادی ۹۶۴۸۵ کولن بر مول بوده است.<sup>[۱۷]</sup>

توان خالص تولیدی و میزان دی‌اکسید منتشرشده در سیستم به‌عنوان پارامترهای خروجی سیستم انتخاب شده‌اند، که به ترتیب در معادله‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{SOFC} - \dot{W}_{Comp} - \dot{W}_{Pump,1} - \dot{W}_{Pump,2} \quad (6)$$

$$CO_2 emission = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{W}_{net}} \times 3600 \quad (7)$$

که در رابطه‌ی ۶،  $W$  در کل معرف توان است ( $\dot{W}_{net}$  توان‌های تولیدی خالص،  $\dot{W}_{SOFC}$  توان‌های پیل سوختی اکسیدجامد،  $\dot{W}_{Comp}$  توان‌های مصرفی کمپرسور، و  $\dot{W}_{Pump,1}$  و  $\dot{W}_{Pump,2}$  توان‌های پمپ‌های اول و دوم). از رابطه‌ی ۷، میزان دی‌اکسید منتشرشده در سیستم از نسبت دبی جرمی دی‌اکسیدکربن به توان خالص تولیدی سیستم در طول یک ساعت حاصل می‌شود.

روش پژوهش در مطالعه‌ی حاضر، برای توسعه‌ی الگوریتم‌های رگرسیون، شامل یک رویکرد هدفمند برای مدل‌سازی رابطه بین پاسخ‌های سیستم و متغیرهای ورودی بوده است. دو متغیر دمای ورودی و چگالی جریان هر کدام در ۵ سطح متفاوت بوده‌اند، که منجر به طراحی جامع شده است. طراحی فاکتوریل اخیر، کاوش قوی در فضای ورودی را تضمین و آثار هر متغیر را در خروجی‌های سیستم ثبت می‌کند. شکل کلی الگوریتم رگرسیون خطی برای سه متغیر را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۸ بیان کرد:

$$Y = \beta_0 + \beta_1(T) + \beta_2(J) + \varepsilon \quad (8)$$

که در آن،  $Y$  پاسخ پیش‌بینی شده،  $\beta_0$  نقطه‌ی قطع،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  ضرایب مربوط به هر متغیر ورودی ( $\beta_1$  مربوط به دمای ورودی و  $\beta_2$  مربوط به چگالی جریان)، و  $\varepsilon$  نشان‌دهنده‌ی عبارت خطا هستند. ضرایب از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون تعیین می‌شوند و یک معیار کمی از تأثیر هر متغیر ورودی در پاسخ را ارائه می‌دهند. عملکرد الگوریتم‌های مذکور با استفاده از مقدار R-squared ارزیابی شده است، که نسبت واریانس در پاسخ‌ها را که از متغیرهای ورودی

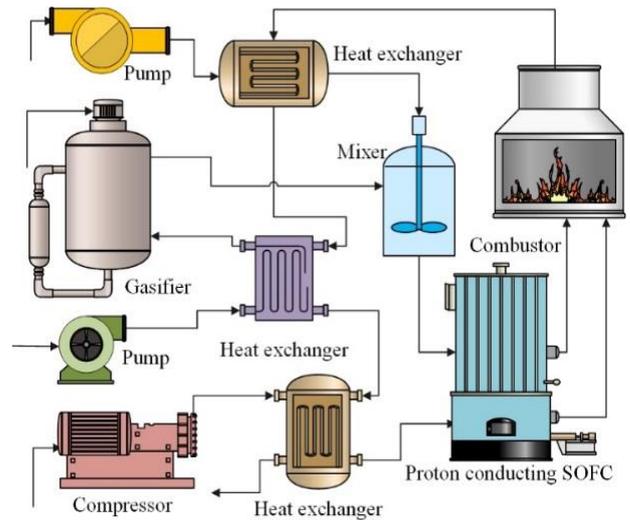
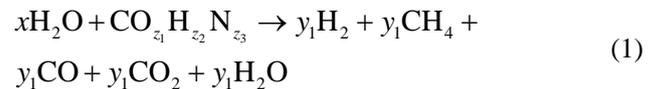


Fig. 1. Schematic of the proposed energy system.

شکل ۱. شماتیک سیستم انرژی پیشنهادی.

الکتروشیمیایی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. بدین ترتیب، بدون نیاز به احتراق مستقیم، برق موردنیاز سیستم تولید می‌شود و بازده تبدیل انرژی افزایش می‌یابد.



که در آن،  $x$  تعداد مول‌های بخار آب به‌عنوان عامل گازی‌سازی است و  $y_i$  تعداد مول‌های اجزاء سینگاز را نشان می‌دهد، که شامل: هیدروژن، متان، مونواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، و بخار آب است.  $Z_1$  نسبت مولی اکسیژن به کربن،  $Z_2$  نسبت مولی هیدروژن به کربن، و  $Z_3$  نسبت مولی نیتروژن به کربن را در ترکیب شیمیایی زباله‌های جامد شهری نشان می‌دهند. برای پیدا کردن تعداد مول‌های اجزاء سینگاز از ترکیب روش‌های کمینه‌سازی انرژی آزاد گیبس و ضرایب نامعین لاگرانژ استفاده شده است. مشخصات عنصری زباله‌های جامد شهری به‌صورت درصد: کربن برابر ۴۸/۸۱، هیدروژن برابر ۶/۸۶، اکسیژن برابر ۴۱/۰۹، و نیتروژن برابر ۲/۷۸<sup>[۱۵]</sup> بوده است.

ولتاژ پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی ( $V$ ) مطابق رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:<sup>[۱۶]</sup>

$$V = V_N - \sum V_L \quad (2)$$

که در آن،  $V_N$  ولتاژ نرنست است، که از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید و  $V_L$  ولتاژ اتلافی است که مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:<sup>[۱۷] و [۱۸]</sup>

$$V_N = \frac{1}{2F} \left[ TR \left\{ \ln \frac{P_{H_2}^a}{P_{H_2O}^c} \sqrt{P_{O_2}^c} \right\} - \Delta \bar{g}^\circ \right] \quad (3)$$

$$\sum V_L = V_{loss}^{ac,a} + V_{loss}^{ac,c} + V_{loss}^{oh} + V_{loss}^{co,a} + V_{loss}^{co,c} = \left[ \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_0^a} \right) + \sinh^{-1} \left( \frac{J}{2J_0^c} \right) \right] \cdot \frac{TR}{F} +$$

$$\left( \sum_i \delta_i / \tau_i \right) J + \left[ \ln \left( \frac{P_{H_2}^a}{P_{H_2}^{a,TPB}} \right) + \ln \left( \sqrt{\frac{P_{O_2}^c}{P_{O_2}^{c,TPB}}} \times \left( \frac{P_{H_2O}^{c,TPB}}{P_{H_2O}^c} \right) \right) \right]$$

تغییرات توان خالص تولیدی سیستم انرژی به ازاء تغییرات هم‌زمان دمای ورودی پیل سوختی اکسیدجامد هدایت پروتونی و چگالی جریان در نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۵ در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، سیستم انرژی پیشنهادی در چگالی جریان‌ها و دماهای بالاتر پیل سوختی، توان خالص بیشتری تولید می‌کند. همچنین می‌توان دریافت که تغییرات دمای تولیدی در چگالی جریان‌های پایین، تأثیر چشمگیری در تغییرات توان تولیدی سیستم ترکیبی نداشته است. با افزایش چگالی جریان تا مقادیر بالاتر از ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع، تغییرات توان تولیدی نسبت به دما به شدت افزایش یافته است؛ به طوری که مقدار آن ۲۲۹ کیلووات بهبود پیدا کرده است. از طرفی، تغییرات چگالی جریان در دماهای بالا، اثر بسیار محسوس‌تری در توان تولیدی سیستم ترکیبی داشته است. با بررسی برخی مطالعات پیشین<sup>[۱۸]</sup> و<sup>[۲۱]</sup> مشاهده می‌شود که نتایج ارائه‌شده در این کار، نتایج گزارش‌شده توسط ایشان را تأیید می‌کند.

در شکل ۴، اثر هم‌زمان نسبت مصرف سوخت و چگالی جریان در دمای ورودی پیل سوختی برابر ۷۲۵ درجه‌ی سلسیوس در توان خالص تولیدی سیستم

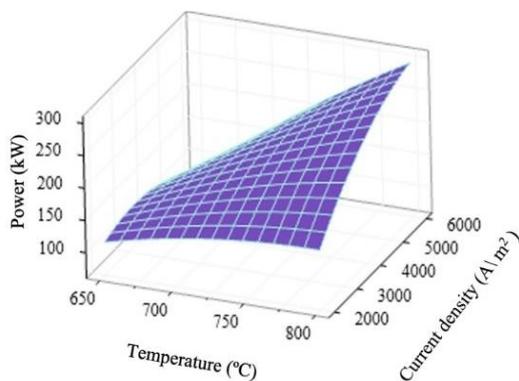


Fig. 3. Variation of the power by changing the temperature and the current density at the fuel utilization ratio of 0.85.

شکل ۳. تغییرات توان خالص به ازاء تغییرات دما و چگالی جریان در نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۵.

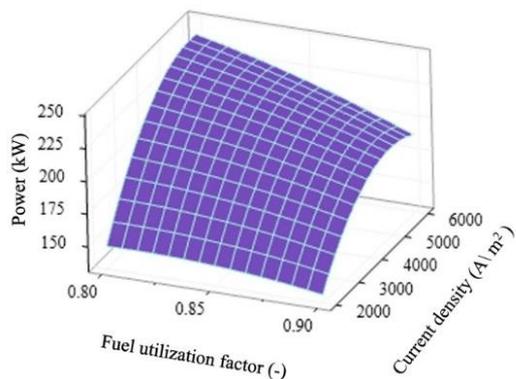


Fig. 4. Variation of the power by changing the fuel utilization ratio and the current density at the inlet temperature of the solid oxide fuel cell of 725 Degrees Celsius.

شکل ۴. تغییرات توان خالص به ازاء تغییرات نسبت مصرف سوخت و چگالی جریان در دمای ورودی پیل سوختی برابر ۷۲۵ درجه‌ی سلسیوس.

قابل پیش‌بینی است، کمی نشان می‌دهد و به‌عنوان معیاری برای دقت پیش‌بینی مدل‌ها عمل می‌کند.<sup>[۱۸]</sup>

### ۳. نتایج و بحث

در بخش کنونی، ابتدا اعتبار مدل‌سازی انجام‌شده تأیید و سپس به بررسی نتایج پرداخته شده است. شکل ۲-a نشان می‌دهد که سینگاز تولیدی طی فرآیند گازی‌سازی در پژوهش حاضر تطابق خوبی با نتایج تجربی لوها<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۱۹]</sup> داشته است. شکل‌های ۲-b و ۲-c، به ترتیب ولتاژ تولیدی و چگالی توان تولیدی پیل سوختی اکسیدجامد به ازاء تغییرات چگالی جریان را نشان می‌دهند.<sup>[۲۰]</sup> با توجه به نتایج اخیر می‌توان دریافت که مدل ارائه‌شده برای پیل سوختی اکسیدجامد، با اعتبار بالا، قابلیت استفاده در پژوهش حاضر را داشته است.

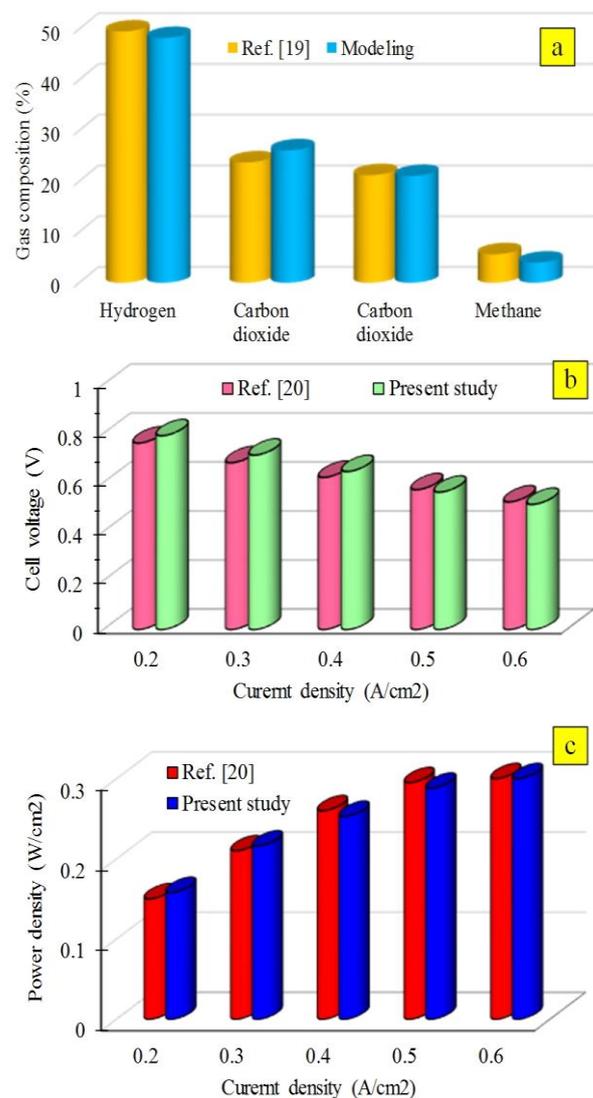
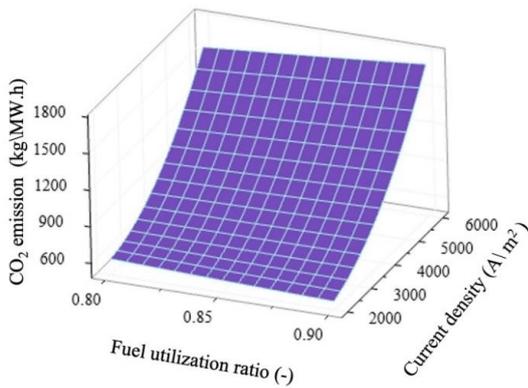


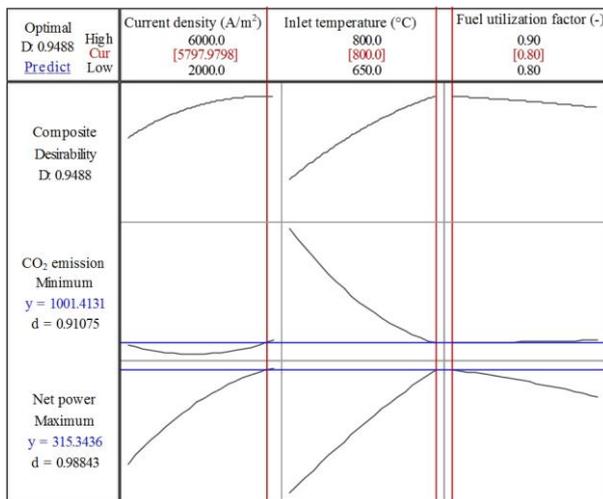
Figure 2. Validation: (a) syngas of the municipal solid waste gasification, (b) voltage and (c) power density of the solid oxide fuel cell versus the current density.

شکل ۲. اعتبار سنجی: (a) سینگاز گازی‌سازی زباله‌های جامد شهری، (b) ولتاژ تولیدی، و (c) چگالی توان تولیدی پیل سوختی اکسید جامد به ازاء تغییرات چگالی جریان.



**Fig. 6.** Variation of the CO<sub>2</sub> emission by changing the fuel utilization ratio and the current density at the inlet temperature of the solid oxide fuel cell of 725 Degrees Celsius.

شکل ۶. تغییرات دی‌اکسیدکربن منتشرشده به ازاء تغییرات نسبت مصرف سوخت و چگالی جریان در دمای ورودی پیل سوختی برابر ۷۲۵ درجه‌ی سلسیوس.

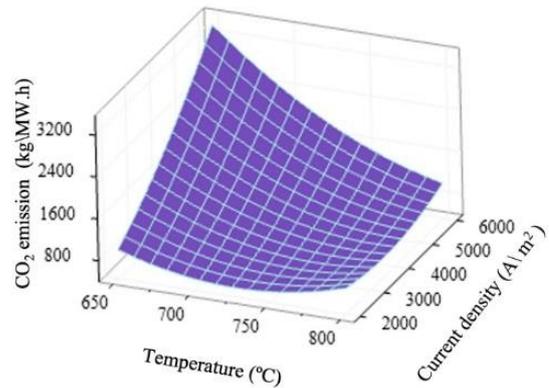


**Fig. 7.** Optimization for maximizing the net power and minimizing the CO<sub>2</sub> emission.

شکل ۷. بهینه‌سازی به منظور بیشینه‌سازی توان تولیدی و کمینه‌سازی دی‌اکسیدکربن منتشرشده.

منتشرشده تقریباً مستقل از تغییرات نسبت مصرف سوخت بوده است. همچنین با دقت در نتایج می‌توان کمینه‌ی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده را تخمین زد، که در چگالی‌های جریان کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع افتاده است. این تذکر لازم است که میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در یک مقدار مشخص چگالی جریان به ازاء همه‌ی مقادیر نسبت مصرف سوخت تقریباً ثابت و کمینه‌ی میزان منتشرشده‌ی آن، در بازه‌ی ۵۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت بوده است.

هدف از بهینه‌سازی سیستم ترکیبی حاضر با در نظر گرفتن سه پارامتر: چگالی جریان، دمای ورودی، و نسبت مصرف سوخت پیل سوختی و دو هدف شامل توان خالص و میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده، یافتن شرایطی بوده است که تحت آن، سیستم به صورت هم‌زمان بیشترین توان خالص را تولید کرده و کمترین میزان نشت دی‌اکسیدکربن را داشته باشد. نتایج بهینه‌سازی اخیر در شکل ۷ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در شرایط بهینه، سیستم انرژی پیشنهادی، ۳/۳۱۵ کیلووات توان خالص تولید کرده و میزان ۱۰۰۱ کیلوگرم



**Fig. 5.** Variation of the CO<sub>2</sub> emission by changing the temperature and the current density at the fuel utilization ratio of 0.85.

شکل ۵. تغییرات دی‌اکسیدکربن منتشرشده به ازاء دما و چگالی جریان در نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۵.

ترکیبی مشاهده می‌شود؛ که با دقت در آن می‌توان دریافت که رفتار منحنی توان تولیدی در در چگالی جریان‌های پایین‌تر و بالاتر از ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع متفاوت بوده است. به طوری که در چگالی جریان‌های بالاتر از مقدار ۳۰۰۰ آمپر بر مترمربع، توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت یک روند کاهشی داشته است؛ در حالی که در چگالی جریان‌های پایین‌تر از آن، توان تولیدی با افزایش نسبت مصرف سوخت ثابت مانده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تغییرات توان تولیدی سیستم به تغییرات چگالی جریان در نسبت‌های مصرف سوخت پایین بیشتر بوده است، به صورتی که مقدار آن در نسبت‌های مصرف سوخت پایین، در بازه‌ی ۱۱۴ تا ۳۱۸ کیلووات تغییر کرده است. از طرفی، نتایج نشان می‌دهند که بیشینه‌ی توان تولیدی سیستم به ازاء چگالی جریان بالا و نسبت مصرف سوخت پایین اتفاق افتاده است.

اثر هم‌زمان دمای ورودی پیل سوختی اکسیدجامد هدایت پروتونی و چگالی جریان در نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۵ در میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم ترکیبی در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در دماهای پایین، مقدار دی‌اکسیدکربن منتشرشده با افزایش چگالی جریان به صورت محسوسی افزایش یافته است؛ در حالی که در دماهای بالا، چگالی جریان تأثیر قابل توجهی در دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم نداشته است. در مقادیر بالای چگالی جریان، مقدار دی‌اکسیدکربن منتشرشده با افزایش دما از ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت افزایش یافته است. در حالی که در چگالی‌های جریان پایین، مقدار آن در سیستم با افزایش دما تغییرات چندانی نکرده است. با بررسی برخی مطالعات پیشین<sup>[۲۲] و [۲۳]</sup> مشاهده می‌شود که نتایج ارائه‌شده در پژوهش حاضر، نتایج گزارش‌شده‌ی ایشان را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به نتایج می‌توان دریافت که بیشینه‌ی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در چگالی‌های جریان بالا و دماهای پایین پیل سوختی و کمینه‌ی مقدار آن در چگالی‌های جریان پایین و دماهای بالا رخ می‌دهد.

در شکل ۶، اثر هم‌زمان نسبت مصرف سوخت و چگالی جریان در دمای ورودی پیل سوختی برابر ۷۲۵ درجه‌ی سلسیوس در میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در سیستم ترکیبی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، حساسیت میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده به تغییرات چگالی جریان بسیار زیاد بوده است، به صورتی که با افزایش چگالی جریان، مقدار این خروجی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. این در حالی است که تغییرات میزان دی‌اکسیدکربن

جدول ۱. مقادیر R-square (adjusted), R-square (predicted) و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی.

**Table 1. Values of R-square, R-square (adjusted), R-square (predicted) for predicting the net power and the CO<sub>2</sub> emission of the energy system.**

	R-square	R-square (adjusted)	R-square (predicted)
Net Power	99.84 %	99.82 %	99.77 %
CO <sub>2</sub> emission	90.46 %	89.10 %	84.99 %

۱- افزایش هم‌زمان چگالی جریان و دمای ورودی پیل سوختی منجر به افزایش قابل توجه توان خالص تولیدی سیستم شده است؛ به‌صورتی که در چگالی‌های بالاتر از ۵۰۰۰ آمپر بر مترمربع، افزایش دما باعث رشد چشمگیر توان از حدود ۸۹ تا ۳۱۸ کیلووات شده است.

۲- بیشینه‌ی توان تولیدی در چگالی جریان‌های بالا و نسبت‌های مصرف سوخت پایین به‌دست آمده است.

۳- بیشترین میزان انتشار دی‌اکسیدکربن در چگالی‌های جریان بالا و دماهای پایین پیل سوختی مشاهده شده است.

۴- در چگالی‌های جریان زیاد، افزایش دما باعث افزایش شدید انتشار دی‌اکسیدکربن حدود ۱۰۸۵ تا ۴۴۶۸ کیلوگرم بر مگاوات ساعت شده است.

۵- کمینه‌ی میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده در چگالی‌های کمتر از ۳۵۰۰ آمپر بر مترمربع و مستقل از نسبت مصرف سوخت، در بازه‌ی ۵۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر مگاوات ساعت حاصل شده است.

۶- بهینه‌ترین شرایط عملیاتی سیستم در چگالی جریان حدود ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت ۰/۸۰ به‌دست آمده است.

۷- در شرایط بهینه، توان خالص تولیدی برابر با ۳۱۵/۳ کیلووات و میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده برابر با ۱۰۰۱ کیلوگرم بر مگاوات ساعت بوده است.

بر مگاوات ساعت، دی‌اکسیدکربن انتشار داده است. شرایط بهینه‌ی مذکور به ازاء چگالی جریان حدوداً برابر ۵۷۹۸ آمپر بر مترمربع، دمای ورودی برابر ۸۰۰ درجه‌ی سلسیوس، و نسبت مصرف سوخت برابر ۰/۸۰ به‌دست آمده است.

در جدول ۱، مقادیر R-square (adjusted), R-square (predicted) و R-square (predicted) برای تخمین خروجی‌های توان خالص و دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی سیستم انرژی ارائه شده است؛ که مطابق آن‌ها، خروجی‌های مدل با قابلیت اطمینان بالایی تخمین زده شده‌اند و مدل رگرسیون قابل استناد است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک سیستم انرژی ترکیبی مبتنی بر گازی‌سازی زباله‌های جامد شهری و پیل سوختی اکسیدجامد با هدایت پروتونی به‌منظور تولید انرژی کم‌کربن توسعه یافته است. هدف اصلی مطالعه‌ی حاضر، بررسی هم‌زمان عملکرد انرژی و آثار زیست‌محیطی سیستم و بهینه‌سازی آن بوده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که ادغام فرآیند گازی‌سازی با پیل سوختی می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به استفاده‌ی بهینه از انرژی شیمیایی موجود در پسماندهای شهری، بهبود عملکرد سیستم، و کاهش آلاینده‌گی‌های زیست‌محیطی شود. همچنین به‌کارگیری مدل‌های رگرسیونی به‌عنوان ابزار یادگیری ماشین، امکان پیش‌بینی دقیق رفتار سیستم و تعیین شرایط عملیاتی بهینه را فراهم ساخته است.

نتایج اصلی پژوهش حاضر به این شرح بوده است:

#### References – منابع

- Ren B. Chi Y. Zhou N. Wang Q. Wang T. Luo Y. Ye J. and Zhu X. 2024. Machine learning applications in health monitoring of renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, pp. 114039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114039>.
- Sadeghi A. Davoudabadi Farahani S. 2019. Thermodynamic and economic optimization of the refrigeration system in a building, *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 35.3(2), pp. 107-116. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/j40.2018.51548.1474>.
- Wang W. Zhou X. Tian G. Fathollahi-Fard A. M. Wu P. Zhang C. Liu C. Li Z. 2022. Multi-objective low-carbon hybrid flow shop scheduling via an improved teaching-learning-based optimization algorithm, *Scientia Iranica*, pp. -. <https://doi.org/10.24200/sci.2022.58317.5665>.
- Roy Keramati M. Shariatmadari N. Karimpour-Fard, M. Saeedanezhad A. Alidoust P. 2019. Effect of aging on dynamic properties of municipal solid waste: A case study of Kahrizak Landfill, Tehran, Iran, *Scientia Iranica*, 26(3), pp. 1077-1088. <https://doi.org/10.24200/SCI.2017.4594>.
- Biancini G. Cioccolanti L. Moradi R. and Moglie M. 2024. Comparative study of steam, organic Rankine cycle and supercritical CO<sub>2</sub> power plants integrated with residual municipal solid waste gasification for district heating and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 241, pp.122437. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122437>.
- Fakhim-Ghanbarzadeh B. Fani M. Farhanieh B. 2011. Exergoeconomic optimization of combined heat and power system incorporating fluidized bed gasifier, *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 27.3(2), pp. 3-13. [In Persian]
- Hu Z. Gao P. Wang B. Pan W. Ding L. Tang L. Chen X. and Wang F. 2024. Decoupling study of municipal solid waste gasification: effect of pelletization on pyrolysis

- and gasification of pyrolytic char. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114334. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114334>.
8. Mojaver P. Chitsaz A. Sadeghi M. and Khalilarya S. 2020. Comprehensive comparison of SOFCs with proton-conducting electrolyte and oxygen ion-conducting electrolyte: thermoeconomic analysis and multi-objective optimization. *Energy Conversion and Management*, 205, pp.112455. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112455>.
  9. Kumuk B. Atak N. N. Dogan B. Yesilyurt M. K. 2025. A comprehensive investigation on the enhancing the thermal efficiency of solid oxide fuel cells through temperature and pore diameter optimization, *Scientia Iranica*, PP. <https://doi.org/10.24200/sci.2025.65609.9576>.
  10. Gao B. and Zhou Y. 2025. Multi-objective optimization and posteriori multi-criteria decision making on an integrative solid oxide fuel cell cooling, heating and power system with semi-empirical model-driven co-simulation. *Energy Conversion and Management*, 325, pp.119371. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119371>.
  11. Yue M. Zhang Y. Lv L. Zhu J. Fu Y. and Ye F. 2026. A novel biomass microwave-assisted pyrolysis system driven by solid oxide fuel cell: modeling and energy analysis. *Energy Conversion and Management*, 348, pp.120680. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120680>.
  12. Ghorbani B. Zendejboudi S. Afrouzi Z.A. and Mohammadzadeh, O. 2024. Efficient hydrogen production via electro-thermochemical process and solid oxide fuel cell: thermodynamics, economics, optimization, and uncertainty analyses. *Energy Conversion and Management*, 307, pp.118175. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118175>.
  13. Li J. Yu T. and Yang B. 2021. A data-driven output voltage control of solid oxide fuel cell using multi-agent deep reinforcement learning. *Applied Energy*, 304, pp.117541. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117541>.
  14. Wang Y. Wu C. Zhao S. Wang J. Zu B. Han M. Du Q. Ni M. and Jiao K. 2022. Coupling deep learning and multi-objective genetic algorithms to achieve high performance and durability of direct internal reforming solid oxide fuel cell. *Applied energy*, 315, pp.119046. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119046>.
  15. Khalilarya S. Chitsaz A. and Mojaver P. 2021. Optimization of a combined heat and power system based gasification of municipal solid waste of Urmia university student dormitories via ANOVA and taguchi approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(2), pp.1815-1827. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.020>.
  16. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2019. Multi-objective optimization using response surface methodology and exergy analysis of a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 156, pp.627-639. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.104>.
  17. Razmi A.R. Sharifi S. Vafaenezhad S. Hanifi A.R. and Shahbakhti M. 2024. Modeling and microstructural study of anode-supported solid oxide fuel cells: experimental and thermodynamic analyses. *International journal of hydrogen energy*, 54, pp.613-634. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.296>.
  18. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2018. Performance assessment of a combined heat and power system: a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system part I: thermodynamic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, pp.287-297. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.096>.
  19. Loha C. Chattopadhyay H. and Chatterjee P.K. 2011. Thermodynamic analysis of hydrogen rich synthetic gas generation from fluidized bed gasification of rice husk. *Energy*, 36(7), pp.4063-4071. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.042>.
  20. Ranjbar F. Chitsaz A. Mahmoudi S.S. Khalilarya S. and Rosen M.A. 2014. Energy and exergy assessments of a novel trigeneration system based on a solid oxide fuel cell. *Energy Conversion and Management*, 87, pp.318-327. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>.
  21. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2019. Multi-objective optimization using response surface methodology and exergy analysis of a novel integrated biomass gasification, solid oxide fuel cell and high-temperature sodium heat pipe system. *Applied Thermal Engineering*, 156, pp.627-639. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.014>.
  22. Mojaver P. Abbasalizadeh M. Khalilarya S. and Chitsaz A. 2020. Co-generation of electricity and heating using a SOFC-ScCO<sub>2</sub> Brayton cycle-ORC integrated plant: investigation and multi-objective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(51), pp.27713-27729. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.137>.
  23. Mojaver P. Khalilarya S. and Chitsaz A., 2021. Combined systems based on OSOFC/HOFC: Comparative analysis and multi-objective optimization of power and emission. *International Journal of Energy Research*, 45(4), pp.5449-5469. <https://doi.org/10.1002/er.6173>.